黑河上游高山区浅层土壤水分变化及其影响因素

吕明侠[1,2]，王一博[1]，刘国华[3]

(1.兰州大学资源与环境学院，甘肃 兰州 730000；2.定西水文水资源勘测局，甘肃 定西 743000；
3.中国科学院大学，北京 100049)

摘要：土壤水是植被生态系统存在的基础。运用统计学及相关性分析法，对黑河上游不同生态类型草地的浅层土壤水分及其影响因素进行分析，结果表明：在自然状态下黑河上游降水量决定了土壤水分含量的空间分布状况，但农业种植活动促进下渗，降低了 30 cm 土层土壤水分含量，使深层土壤含水量增加；对不同土层土壤水分的主要影响因子进行分析，降水对植物生长期表层 0~20 cm 土壤水分的波动变化产生强烈影响，而且 20 cm 土层由于降水被植物茎杆截留及根系密集分布，土壤含水量最大，而气温变化影响土壤温度且主要作用于非生长期和 30 cm 土层以下土壤水分，导致研究区植被生长期延长而冻结期缩短，改变区域水文生态环境。

关键词：高山区；土壤水分；影响因素；气候变化

土壤水是指赋存于土壤孔隙中的水，不仅是生态系统赖以存在的物质基础，也是水文循环的驱动因子[1]。土壤水分受降水、气温、植被、土壤、地形等要素的综合作用，在时间和空间尺度上表现出不同的分布特征[2-6]。气候变化使土壤水—热过程发生变化，高寒山区的土壤水分受寒冷气候和山坡的影响，时空分布更为复杂[7-8]，研究高海拔山区土壤水文过程是研究高山产流区水文循环和生态环境变化的核心内容，也是全球气候变化背景下土壤—水文—大气研究的关键。目前，国内外关于土壤水分时空异质性的研究取得了一定研究成果[9-10]，但对各土壤层水分变化的影响因子研究较少，因此，进行高寒山区浅层土壤水分变化影响因素的研究具有重要意义。

黑河上游区属于高山高寒区生态系统，广泛分布着天然高山草原和林草过渡草地，但在东部适宜人类生活的区域分布有农业种植影响下的农牧交错草地[11]。近年来，气候变化引起高寒生态系统水—热过程发生变化，黑河上游高山高寒区对气候变化敏感，生态脆弱，黑河流域水文研究受到广泛关注[12-13]。Chen 等[14]通过系统观测和数学模型，对黑河上游山区水文循环及水热耦合过程进行了足量化分析；Peng 等[15-16]通过观测黑河上游森林生长状态研究其生态水文效应；刘洪兰等[17]对全流域季节降水进行了分析并研究其对径流的影响；王蕙等[18]、唐振兴等[19]分析了黑河上游土壤水分与植被空间变异的关系以及对土壤饱和导水率等进行了单要素分析，白晓[等[9]分析了黑河上游植被特征对土壤水分的影响。目前黑河流域水文过程研究主要集中于大尺度、单因子且易于观测的水文过程及其生态效应，对人类活动影响下的浅层土壤水分变化影响因子的研究较少。

本研究以黑河上游主要产流生态类型——高山生态系统为研究对象，运用地统计学方法通过对直接影

基金项目：国家自然科学基金项目(41877149)；中科院冻土工程国家重点实验室开放基金(SKLFSE201911)
作者简介：吕明侠(1989-)，女，兰州大学在读硕士研究生，研究方向为水文水资源. E-mail: lvmx19@lzu.edu.cn
通信作者：王一博. E-mail: wangyib@lzu.edu.cn

响植被生态系统的浅层土壤水分变化的水－热因子进行分析，研究气候变暖和人类种植活动影响下，各土层土壤水分变化过程。为未来进一步研究和分析在全球气候变化背景下，高山草地水文循环过程及有效评价山区水资源动态平衡和构建高山区水文模型提供理论依据。

1 数据与方法

1.1 研究区域

研究区域位于黑河上游的高山草地和农牧交错地带，选取不同草地类型的 3 个典型样地作为研究对象，在实验站点进行实验观测（表 1）。其中，扁都口农牧交错带草地试验地两侧为牧场和旱耕地，大野口森林草地过渡带试验点设置于寒生高山森林与草地之间的过渡平台，地势平坦。康乐高山草原草地试验点位于山前坡地，为冬季牧场，围栏圈护一年后进行观测。研究区以干旱半干旱型植被为主，植被株高从 5~30 cm 不等，根系分布于 0~30 cm 土层，其中须根主要分布在 0~10 cm。广泛分布禾本科(Gramineae)、莎草科(Cyperaceae)植被，康乐草原草地植被盖度最低，为 30%，主要植被为冰草*(Agropyron cristatum)*及薹草*(Carex)*；扁都口与大野口的植被盖度分别为 95%和 60%，除优势种冰草*(Agropyroncristatum)*及薹草*(Carex)*外，还分布有一定数目的狼毒*(Stellera chamaejasme)*以及蔷薇科(Rosaceae)和委陵菜属（*Potentilla chinensis*）。土壤、气象因子等由各试验点独立设站观测记录。三种草地类型样地在黑河上游自东向西分布，类型差异明显，草地类型分别称为农牧交错带、林草过渡带、高山草原草地。

表 1 黑河上游试验点信息

Table 1 Experimental site information table of the upper reaches of Heihe River

草地类型	纬度(N)	经度(E)	海拔/m	试验点位置
农牧交错带	38°12′5.2″	100°56′13″	2 886	扁都口：民乐县内祁连山山口坡地
林草过渡带	38°33′20.68″	100°17′4.24″	2 698	大野口：肃南裕固县境内的红石峡
高山草原	38°50′1.09″	99°54′46.72″	2 839	康乐：肃南裕固县康乐乡

1.2 数据及研究方

1.2.1 数据收集

在黑河上游 3 种典型草地类型中分别在地势相对平坦、生态环境较为天然且具有代表性的区域选取观测样地，在样地中心位置安装仪器进行试验观测及数据采集。采集数据包括 (1) 土壤特性数据：黏粒、粉粒、砂粒、饱和导水率、容重；(2) 主要气象数据：降水、气温；(3) 水热数据：地表以下 40 cm 范围内土壤体积含水量及对应深度土壤温度。其中，气象数据由美国生产的自记式气象站（型号：美国 Spectrum 公司 Watch Dog 2000 小型气象站）自动采集，包括地面净辐射量、地面 2 m 气温、相对湿度、降雨、风速、风向等，数据采集频率为每 30 min 一次。土壤水、热数据通过 ECH$_2$O（美国 Decagon 公司 5TE）自动土壤水热观测仪器自动连续采集，数据采集探头分 4 层埋设（分别为 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm)，每组同时采集土壤水分、温度，采集频率为每 30 min 一次，本次实验观测时间为 2018 年 1—12 月。

同时，在研究样地内开挖土壤剖面，在剖面相应深度用环刀取土样，土壤样品带回实验室分别测试各层土壤特性数据。

1.2.2 研究方法

土壤饱和导水率用定水头法测得，干容重用烘干称重法测得，土壤粒径利用 Mastersize 2000 型激光粒度仪测得。运用变异系数 C_v 进行时空变异性分析，采用 Pearson 双侧相关性检验分析影响因子的相关关系。数据统计、分析利用 SPSS 25.0 软件实现，运用 Origin2018 软件绘图。

2 结果

2.1 土壤特征

对黑河上游 3 个典型草地的下垫面因子特征进行分析，结果表明（图 1），黑河上游的草地表层土壤以粉质砂土为主，扁都口农牧交错带草地土壤为粉质土，大野口林草过渡带草地为粉（砂）质黏壤土，康乐高山草原草地为粉（砂）土。林草过渡带草地土壤在 30 cm 以下主要为砾石碎屑层，土壤内部结构影响土壤饱和导水率、土壤容重及土壤通透性和土壤的其他特性。

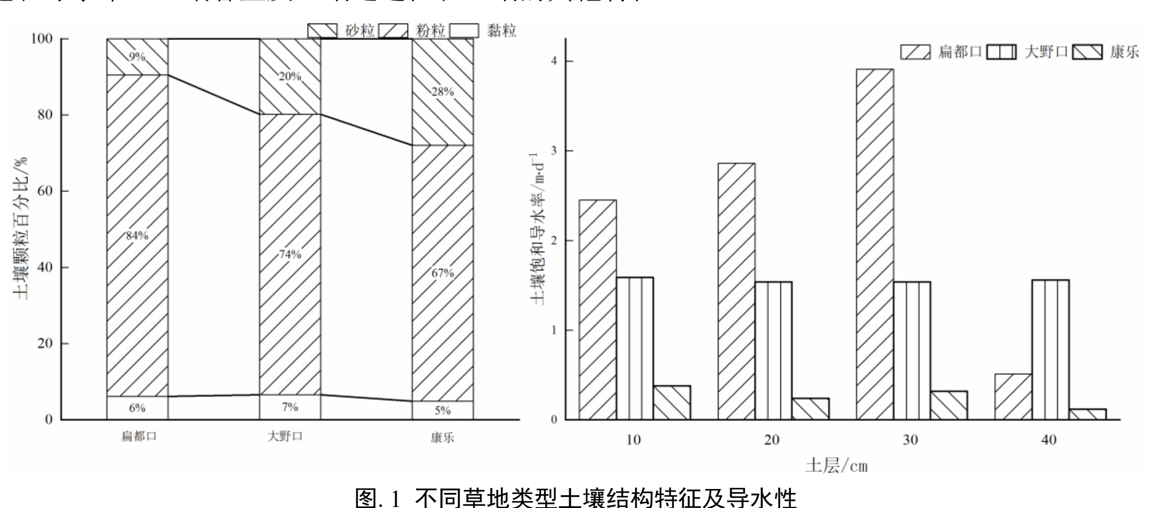


图. 1 不同草地类型土壤结构特征及导水性

Fig. 1 Soil structure characteristics and conductivity of different grassland types

扁都口草地植被覆盖度为 95%，土壤中粉粒所占比例最大，而砂粒最小，分别为 84.4%和 9.5%，其土壤饱和导水率在 0~30 cm 土层随土壤深度增大而增大，而在 40 cm 土层出现急剧减小的现象，由于农业种植活动，导致 10 cm 土壤层中有机质相对富集，土壤容重最小，随土壤深度加深，有机质含量减少而容重增大，40 cm 土层土壤容重达到 1.1 $g\cdot cm^{-3}$。大野口草地的植被盖度为 60%，土壤的粉粒含量与农牧交错带草地比较呈减少趋势，而砂粒有增加趋势，大野口草地粉粒和砂粒分别为 73.6%和 19.9%，各土层饱和导水率最大值与最小值相差仅 0.05 $m\cdot d^{-1}$，说明林草过渡带的土壤结构在浅层基本一致，而土壤容重则从 10~20 cm 有明显增大趋势；康乐高山草原草地植被盖度最低，仅为 30%，土壤砂粒含量最大，黏粒及粉粒含量最小，分别为 27.9%、67.2%和 4.91%，其土壤的饱和导水率整体较小，但是在不同土层中差异较大，表层 10 cm 土壤饱和导水率约是 40 cm 土层土壤饱和导水率的 3 倍，这表明高山草原土壤的质地和

结构随土壤深度增加表现出明显的差异性，而其土壤容重在表层 10 cm 和深层 40 cm 比中间 20 cm 和 30 cm 土层大，说明高山草原表层出现了土壤侵蚀和沙化现象。土壤植被盖度越大，致密的根系网及土壤有机质有利于土壤水分的存储及下渗，降水缓冲能力越强。粉质土壤结构较疏松，砂粒含量少，土壤孔隙度高及贯通性较好，导水能力强，而粉粒含量低、砂粒含量高的土壤，土壤结构致密，水分的储存能力及导水能力差，植被盖度低。

2.2 土壤水分特征

土壤水分是土壤环境的主要影响因素，也是土壤的主要组分。土壤水分的变化受到土壤属性、植被及大气等条件的影响，在时空分布上有一定的变异性。对研究样地浅层土壤水分的时空分布及变异性（表 2）进行分析。黑河上游草地 20 cm 土层土壤水分含量最高，40 cm 土层最低。大野口林草过渡带草地土壤水分含量在生长期内最大，而在土壤冻结期较扁都口农牧交错带草地土壤水分含量低，而且扁都口农牧交错带草地各层土壤含水量相差最小，2018 年全年日平均土壤含水量仅 3.1%，生长期仅 3.5%。扁都口农牧交错带和康乐草原草地 10 cm 土层土壤水分生长期变异系数最大，而大野口和康乐草原草地 30 cm 土壤水分变异系数最小。

表 2 不同类型草地不同时段土壤水分含量及其变异系数

Tab. 2 Soil moisture content and variation coefficient in different types of grassland at different time periods

土壤类型	2018 年日平均土壤含水量/%				（生长期）日平均土壤含水量/%				（生长期）土壤水分变异系数 C_v			
	10cm	20cm	30cm	40cm	10cm	20cm	30cm	40cm	10cm	20cm	30cm	40cm
农牧交错带草地	11.6	14.7	12.5	12.8	14.4	17	14.5	13.5	0.25	0.13	0.13	0.12
林草地过渡带草地	12.2	14.4	12.1	6.5	16.7	19.3	15	8.4	0.19	0.22	0.11	0.18
草原草地	7.6	9.2	8.4	4.5	9.2	10.8	9.4	4.5	0.32	0.21	0.03	0.23

2.3 驱动因子特征

2.3.1 降水

黑河上游属于高山气候类型，但由于每个样地所在区域的地理位置、海拔及下垫面的区域性差异，导致各研究样地的降雨强度在空间上有所差异，但总体降水过程较为一致。3 种典型样地的月降雨量如图 2 所示，2018 年研究区降水总量小，最大降雨强度较小，植物生长期和降雨期主要集中在 4—9 月。扁都口农牧交错带草地总降水量最多为 430.0 mm，最大日降水量为 26.2 mm。大野口和康乐草原草地年总降水量分别为 290.3 mm、257.3 mm，相差较小，最大日降水量分别为 18.3 mm、24.4 mm，扁都口和大野口草地 7 月降水量最为充足，分别为 113.3 mm、84.3 mm，8 月份开始减少，12 月和 1 月份无降水，而康乐高山草原草地 8 月份降水量最大，达 93.7 mm，时间上有所推迟。

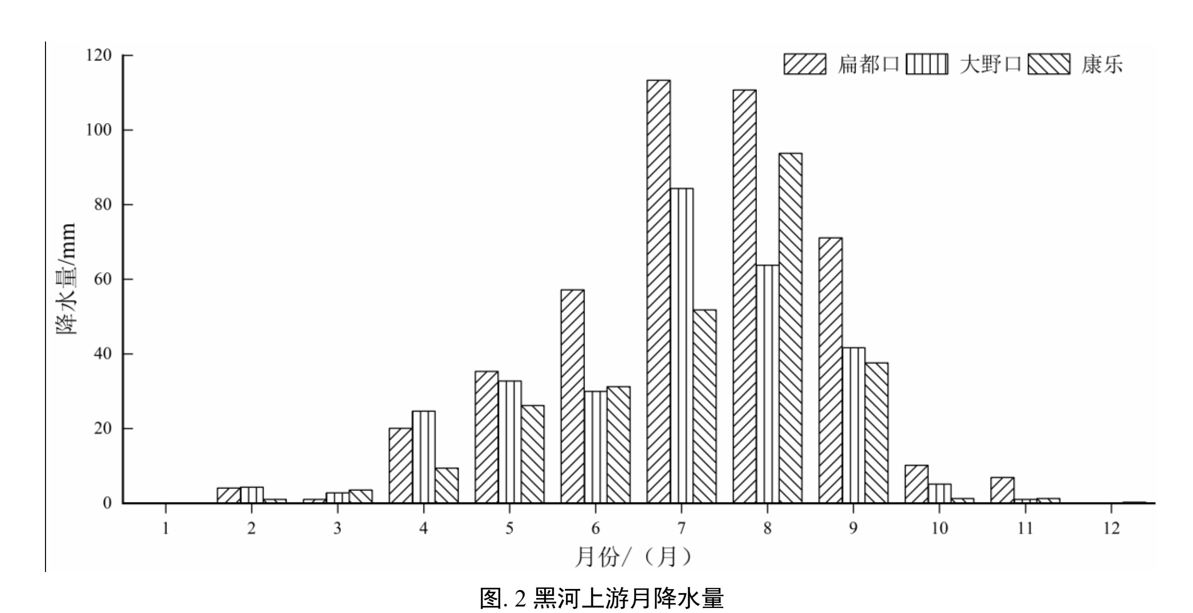


图. 2 黑河上游月降水量

Fig. 2 Monthly precipitation in the upper reaches of the Heihe River

2.3.2 气温、土壤温度

气温变化影响蒸散发强度和土壤温度，作用于陆面水文循环过程，影响土壤中水分的存储和运移。黑河上游气候类型一致，气温空间变化较小（表 3），2018 年扁都口和康乐草原草地全年日平均气温较高，土壤温度明显高于气温，而大野口草地气温最低，土壤温度与气温基本相同，略高于气温；生长期内大野口草地气温最高，而土壤温度最低，除 10 cm 土层土壤温度略高于气温外，其他层土壤温度均低于气温，扁都口草地气温最低，而土壤温度较高。日平均最高气温均出现于 7 月 25 日，扁都口、大野口和康乐高山草原草地最高日均气温分别为 23.0、20.7、19.6℃，而日均最高土壤温度均迟于最高日均气温，且随土壤深度的加深而延迟时间增长。日均气温于 10 月 19 日同时开始出现负值，日均土壤温度开始出现负值时间均较气温负值发生时间延迟，且大野口土壤温度低于 0 ℃以下时间最早，而扁都口草地出现时间最迟，且随深度增加时间延迟更长。土壤温度与气温具有显著的正相关性（表 4），除康乐草原草地 20 cm 土层出现增大的现象外，沿土壤深度方向有所减弱，同时，在生长期内相关性有所降低。

表 3 不同下垫面全年及生长期日平均气温与生长期日平均土壤温度

Tab. 3 The average daily air temperature and the average daily soil temperature in the whole year and the growing period of different underlying surfaces

	全年土壤温度和气温平均值/°C					生长期土壤温度和气温平均值/°C				
	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	气温	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	气温
扁都口	6.73	7.11	7.66	6.60	2.38	13.41	13.55	13.62	11.99	10.02
大野口	2.52	2.19	2.27	2.33	2.14	10.81	9.82	9.33	9.99	10.38
康乐	6.58	6.84	6.87	6.97	2.42	14.18	14.37	13.58	13.21	10.37

表 4 不同下垫面温度均值及气温与土壤温度间的相关关系

Tab. 4 The mean temperature of different underlying surface and the correlation between air temperature and soil temperature

	全年土壤温度和气温相关性				生长期土壤温度和气温相关性			
	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm

扁都口	0.938**	0.908**	0.868**	0.827**	0.885**	0.810**	0.722**	0.548**
大野口	0.945**	0.929**	0.904**	0.906**	0.877**	0.822**	0.728**	0.738**
康乐	0.949**	0.952**	0.915**	0.897**	0.881**	0.883**	0.794**	0.744**

注：*表示在 0.01 水平上显著相关；**表示在 0.05 水平上显著相关。

3 讨论

3.1 降水与土壤水分的相互影响

对研究区典型样地降水与土壤水分含量进行分析（图 3）。3 个研究区属于黑河上游的高山区，在冬季区域会出现土壤冻结现象。冻结期土壤水分状态发生变化，土壤含水量低，且冬季降水量少，固态降水与土壤水分的直接作用微弱，3 月初气温不断升高，土壤开始消融，土壤水分开始逐渐稳定上升，到 7 月份雨季来临，高强度及高频率降水影响土壤水分发生强烈波动。

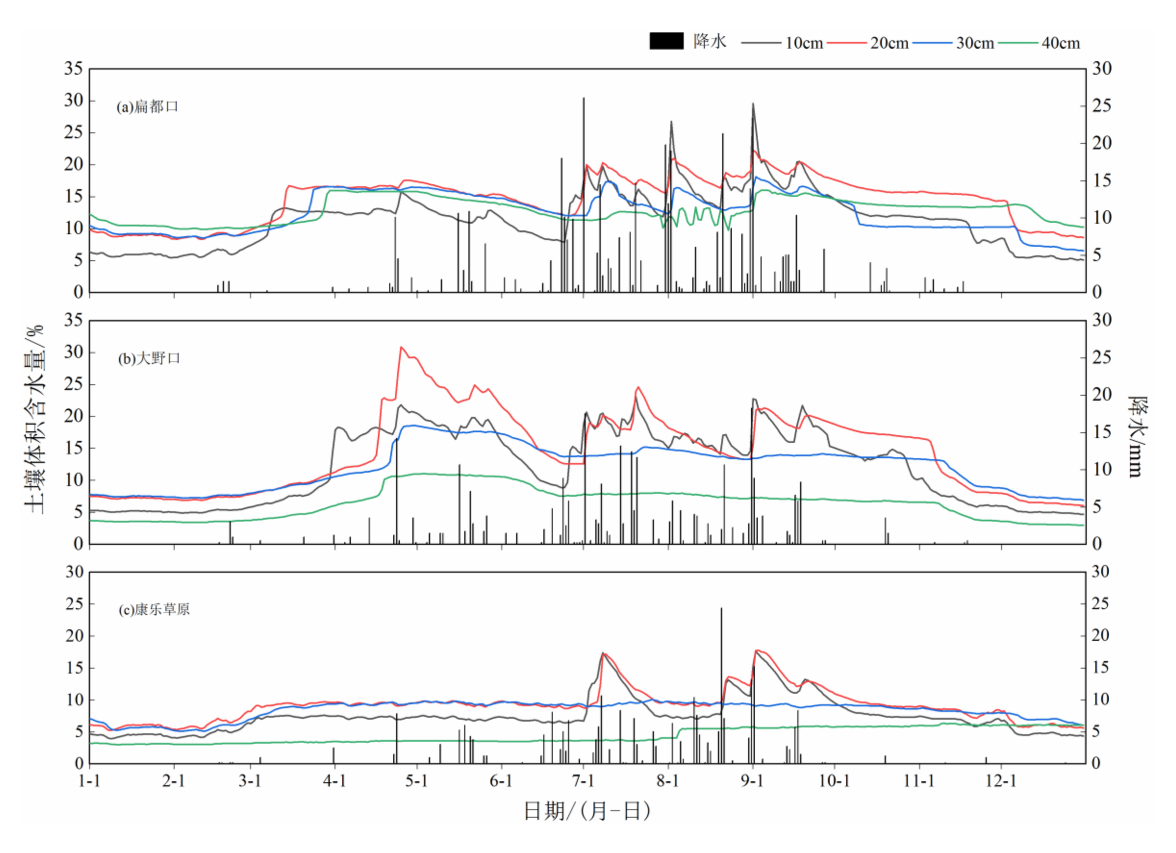


图. 3 黑河上游不同草地植被生长期内土壤水分与降雨变化

Fig. 3 Changes of soil moisture and rainfall during vegetation growth in different grasslands in the upper reaches of the Heihe River

分析表明，黑河上游土壤水分主要来源于降水和季节性冻土消融[20]，降水的空间分布在很大程度上决定了土壤水分的空间分布水平并影响其波动变化过程[21]。在不受人类生产活动影响的大野口和康乐草地区，一方面，降水的波动变化只对表层 20 cm 的土壤水分产生强烈影响[22]，生长期 10 cm 土层变化幅度分别为 14.2%、11.2%，20 cm 土层分别为 18.3%、9.1%，尤其在 20 cm 植物根系密集层，由于植被对降水的截留作用及顺着植物茎杆下渗作用，使得根系密集的 20 cm 土层土壤含水量最大，分别为 19.3%和 10.8%，而表层 20 cm 以下土层土壤水分受前期降水的逐渐补给累积上升之后达到稳定，而对单次降雨的短期响应微弱，

变化幅度小。另一方面，由于降水的空间分布不均匀，康乐草原草地区域全年降水量少，影响植被生态环境，植被盖度最低，土壤结构紧密使得土壤水分储存和运移受到一定的限制，导致土壤含水量明显低于大野口林草过渡带草地（表 2）。但人类农业种植活动改变了土层 30 cm 的土壤结构，土壤组分也发生变化，土壤导水性得到改善，一方面引起扁都口农牧交错带草地 30 cm 土层土壤水分在降水的波动变化下发生强烈的一致性波动变化（图 3），而 40cm 土层，由于上层补给土壤含水量较高且在土壤调蓄作用下波动变化微弱；另一方面，扁都口农牧交错带草地降水量最为丰富，但受人类活动影响其 30 cm 土层土壤水分含量却低于大野口林草过渡带草地土壤水分含量，10 cm、20 cm 土层差值最大，为 2.3%，而 40 cm 土层却明显高于大野口草地土壤含水量，差值达 5.1%，主要是因为农作物生长大量消耗表层土壤水分，以及土壤结构的改变增加了表层土壤水分的下渗，形成了土壤水分的空间分布与降水有所差异的现象。而在降水量严重缺乏的康乐高山草地区域，土壤含水量严重缺乏，土壤沙化严重，改变了当地植物生长的环境条件，植被覆盖度最低，整体土壤水分含量较低，20 cm 土层最高才达到 10.8%，受降水影响范围较浅。

总之，黑河上游属于半干旱气候区，降水是土壤水分空间分布及短期波动变化的关键影响因素[23]。空间分布上，降水量呈现东多西少趋势，其时空变化决定了土壤水分时空分布的整体水平，降水量越大，土壤水分含量越大，但人类活动对土壤剖面水分的分布产生了强烈影响，降低了 30 cm 土层土壤水分含量，使浅层土壤水分下渗且在深层累积。在全球性的气候变化下，黑河上游降水量增加[13]，土壤水分含量随之上升，在农牧业区域促进深层土壤水分的储存，提高农业生产率，改善生态环境及人民生活水平，有利于促进人与自然和谐共生的社会环境；而在降水量缺乏的地区，降水量增加促进植物生长，有效缓解土壤沙化并改善土壤结构，直接影响当地土壤—植被水文循环过程，进而改变内陆河区域水文循环，影响内陆河区域气候及水资源的时空格局。

3.2 土壤温度与土壤水分的相互关系

根据 2018 年黑河上游不同下垫面各层土壤温度与土壤水分变化过程资料，对其进行 Pearson 相关性分析（图 4、表 5）。在作物生长期，30 cm、40 cm 土层土壤水分与土壤温度相关关系较好，表层 20 cm 土壤水分虽然波动最为强烈，但与土壤温度无明显的相关关系[24]，主要因为生长期气温升高，作物生长及降水等因素的复杂作用，浅层土壤水分受土壤温度的作用微弱，由于较深土壤层上层土壤的调蓄作用，使得土壤水分与土壤温度微弱波动变化的相关性较强。在不同季节，土壤水分与土壤温度有显著的正相关关系，并且随土壤深度的增加而相关性减弱，到 40 cm 土层相关性最弱。说明气温较低的冬季土壤水分的主要影响因子是气温主导下的土壤温度变化，而夏季引起土壤水分变化的因子复杂，气温对深层土壤的作用较表层土壤明显，但总体作用微弱。

表 5 不同时期土壤水分与土壤温度的相关系数

Tab. 5 Correlation coefficient between soil moisture and soil temperature in different periods

	2018 年（θ-T）				生长期（θ-T）			
	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm
扁都口	0.752**	0.752**	0.632**	0.331**	0.14	0.09	-.173*	-.544**
大野口	0.822**	0.722**	0.796**	0.744**	-0.04	-0.496**	-.510**	-.479**
康乐	0.632**	0.728**	0.897**	0.144**	0.02	0.03	0.484**	-0.07

注：*表示在 0.01 水平上显著相关；**表示在 0.05 水平上显著相关。

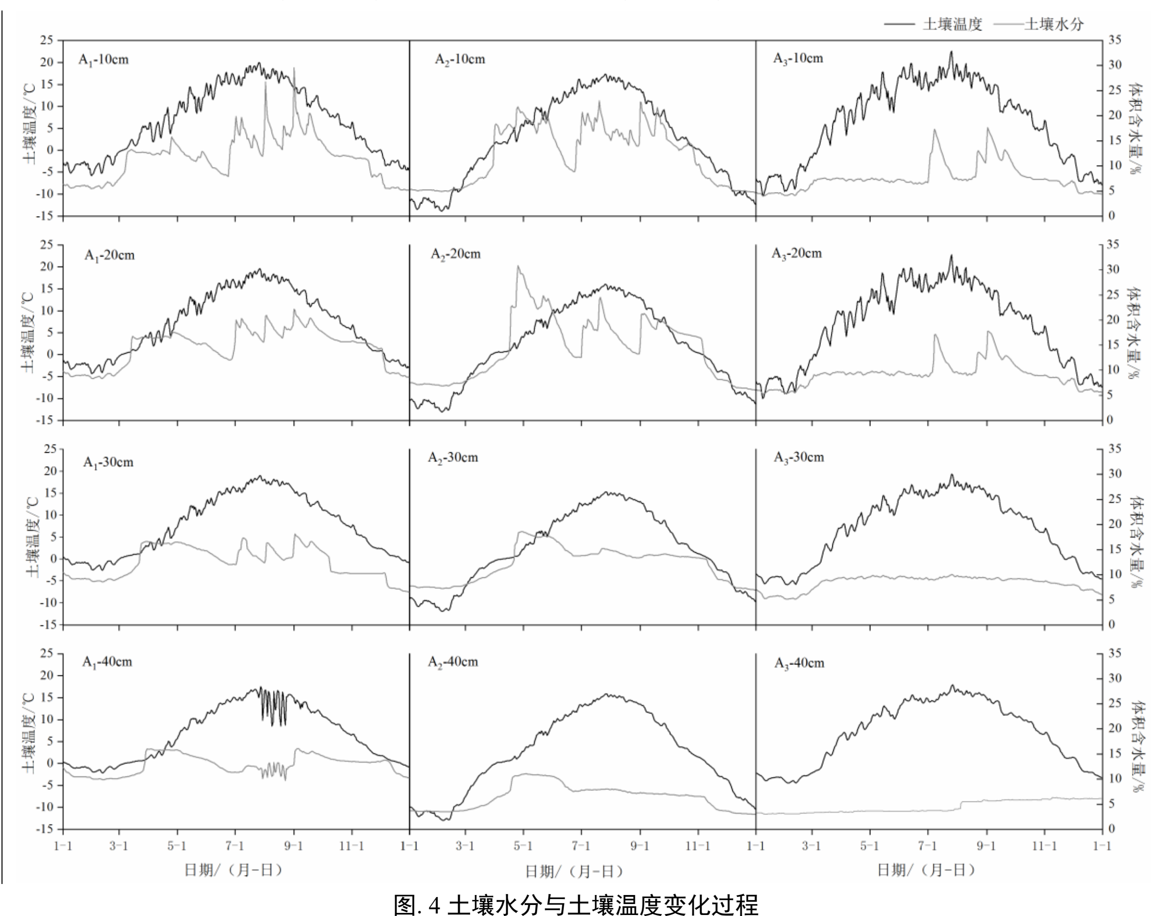


图. 4 土壤水分与土壤温度变化过程

Fig. 4 Soil moisture and soil temperature change process

温度作为驱动土壤水分迁移的重要因子，通过影响土壤水分的附存形式及活动性强度，影响着土壤水分的再分布状况[25]。黑河上游气候类型基本相似，气温相差较小，全年及生长期相差分别为0.28 ℃和0.35 ℃，但由于受下垫面植被覆盖度及人类活动的影响，造成土壤温度相差较大。大野口林草过渡带草地受人类活动影响最小，生态环境良好，土壤温度最低，与气温最为接近；生长期 30 cm 土层土壤水分相差最大，为 1.05 ℃，而土壤含水量丰富，在调节土壤温度的同时调节区域水文循环过程，使得土壤水分与土壤温度相关性最好（表 5）。虽然康乐高山草原草地表层植被盖度低，但表层结皮的存在具有保温保水作用，使得土壤温度明显高于气温，40 cm 土层相差最小，为 2.8 ℃，同时，表层土壤水分与大气作用受到限制，使得土壤水分与土壤温度的相关性随深度增加而增强。由于扁都口草地人类种植活动，表层存在具有保温作用的大量残留植物根系，能量传输受到限制，改变了该区域土壤的水热交换过程，而且主要作用于气温较低的

非生长期（表 3），表层土壤水分下渗引起较深 40 cm 土层土壤水分含量相对升高，生长期 20 cm 与 40 cm 土层土壤水分相差仅 3.5%。全球气候不断变暖，黑河上游气温升高，直接导致土壤温度升高，引起浅层土壤消融时间提前，冻结时间推迟[26]，土壤冻结期变短，冻结厚度变薄，使土壤水分通过蒸散发及壤中流的损失增大，可能影响浅层土壤水分含量下降，引起土壤水热交换强度及过程发生改变，作用于高山区陆面水文循环进而影响高山寒区原生态系统的安全稳定，影响区域水文循环过程及水资源的时空分布。

4 结论

根据黑河上游高山区不同草地生态类型的浅层土壤水分及其影响因素进行分析研究，得到了以下结论：

（1）在自然状态下黑河上游土壤水分分布状况由降水决定，呈现东高西低的趋势，但在人类生产活动影响下，改变了浅层土壤结构及基本属性，导致该区域表层 30 cm 土层土壤水分含量相对降低，使水分下渗能力增强，深层土壤含水量增加。

（2）对土壤水分主要影响因子分析结果显示，在黑河上游高山区，气温主要作用于非生长期和深层 30cm 以下土壤水分，而降水则对生长期表层 0~20 cm 范围土壤水分的波动变化产生强烈影响。

（3）气候变化将会加速土壤水—热过程发生变化，导致植被生长期延长而土壤冻结期缩短，土壤水文循环过程发生改变，进一步影响植被生态系统及水资源状况的时空分布。

参考文献：

[1]Ma Y T, Remke L, Van Dam, Dushmantha H, et al. Soil moisture variability in a temperate deciduous forest: insights from electrical resistivity and throughfall data[J]. Environmental Earth Sciences,2014,72(5):1367-1381.

[2]车宗玺，李进军，汪有奎，等.祁连山西段草地土壤温度、水分变化特征[J].生态学报,2018,38(1):105-111.[Che Zongxi, Li Jingjun, Wang Youkui, et al. Characteristics of soil temperature and water content variation in the western Qilian Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica,2018,38(1):105-111.]

[3] 戴 黎 聪 ， 柯 浔 ， 张 法 伟 ， 等 . 青 藏 高 原 季 节 冻 土 区 土 壤 冻 融 过 程 水 热 耦 合 特 征 [[J/OL]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1072.P.20190912.1528.002.html, 2020-03-21. [Dai Licong, Ke Xun, Zhang Fawei, et al. Characteristics of hydro-thermal coupling during soil freeze-thaw process in seasonally frozen Regions of Qinhai-Tibet Plateau[J/OL]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1072.P.20190912.1528.002.html, 2020-03-21.]

[4]Famiglietti J S, Ryu D, Berg A A. Field observations of soil moisture variability across scales[J]. Water Resources Research,2008,44(1):1-16.

[5]苏莹，陈林，李月飞，等. 荒漠草原不同类型土壤水分时空变化特征[J]. 干旱区研究,2018,35(6):1308-1316.[Su Ying, Chen Lin, Li Yuefei, et al. Spatiotemporal variation of moisture content of different soil types in desert steppe[J]. Arid Zone Research,2018,35(6):1308-1316.]

[6]濮阳雪华，王春春，苟清平，等. 陕北黄土区植被群落特征与土壤水分关系研究[J].草业学报,2019,28(11):184-191. [Puyang Xuehua, Wang Chunchun, Gou Qingping, et al. Relationship between vegetation community and soil moisture in the loess region of northern Shaanxi Province[J]. Acta Prataculturae Sinica,2019,28(11):184-191.]

[7]陈玉兴，江利明，梁林林，等. 基于 Sentinel-1 SAR 数据的黑河上游冻土形变时序 InSAR 监测[J].地球物理学报,2019,62(7):2441-2454.[Chen YuXing, Jiang LiMing, Liang LinLin, et al. Monitoring permafrost deformation in the upstream Heihe River, Qilian Mountain by using multi-temporal sentinel-1 InSAR dataset[J]. Chinese Journal of geophysics,2019,62(7):2441-2454.]

[8]骆琪，阳坤，陈莹莹，等. 利用土壤水分数据估计高寒区土壤有机碳含量的方法研究[J]. 中国科学:地球科学,2020,50(04):570-580. [Luo Qi, Yang Kun, Chen Yingying, et al. Method development for estimating soil organic carbon content in an alpine region using soil moisture data[J]. Scientia Sinica(Terrae),2020,50(4):570-580.]

[9]白晓，张兰慧，王一博，等. 祁连山区不同土地覆被类型下土壤水分变异特征[J]. 水土保持研究,2017,24(2):17-25.[Bai Xiao, Zhang Lanhui, Wang Yibo, et al. Variations of soil moisture under different land use and land cover types in the Qilian Mountain, China [J]. Research of Soil and Water Conservation,2017,24(2):17-25.]

[10]韩姣姣，段旭，赵洋毅. 金沙江干热河谷不同植被坡面土壤水分时空分布特征[J]. 干旱区地理,2019,42(1):121-129. [Han Jiaojiao, Duan Xu, Zhao Yangyi. Spatial and temporal variability of soil moisture on slope land of different vegetation of dry-hot valley in Jinsha River[J]. Arid Land Geography, 2019,42(1):121-129.]

[11]刘国华. 黑河上游典型草地土壤水分与产流入渗特征研究[D]. 兰州：兰州大学,2016.[Liu Guohua. Study's on Soil Moisture and Runoff Generation Infiltration under Typical Grassland in the Upper Reaches of the Heihe River[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016.]

[12]王昱, 卢世国, 刘娟娟, 等. 春季枯水期黑河水体理化性质的空间分布特征[J]. 生态与农村环境学报,2019,35(4):433-441. [Wang Yu, Lu Shiguo, Liu Juanjuan, et al. Spatial distribution characteristics of the physical and chemical properties of water in the Heihe River during low water periods in spring[J]. Journal of Ecology and Rural Environment,2019,35(4):433-441.]

[13]刘浏, 刘丽丽, 索滢. 近 53 a 黑河流域水文气象要素时空演变特征[J]. 干旱区研究,2017,34(3):465-478.[Liu liu, Liu Lili, Suo Ying. Spatiotemporal evolution of hydro-meteorological variables in the Heihe River Basin in recent 53 years [J]. Arid Zone Research, 2017,34(3):465-478.]

[14]Chen R S, Song Y X, Kang E S, et al. A cryosphere-hydrology observation system in a small alpine watershed in the Qilian Mountains of China and its meteorological gradient[J]. Arctic,Antarctic,and Alpine Research,2014,46(2):505-523.

[15]Peng S Z, Zhao C Y, Xu Z L. Modeling spatiotemporal patterns of understory light intensity using airborne laser scanner (LiDAR) [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2014,97(97): 195–203.

[16]Peng S Z, Zhao C Y, Xu Z L. Modeling stem volume growth of Qinghai spruce (Picea crassifolia Kom) in Qilian Mountains of Northwest China[J]. Scandinavian Journal of Forest Research,2015,30:449-457.

[17]刘洪兰, 张强, 郭俊琴, 等. 黑河流域春季降水空间分异性特征及其与黑河流量的相关分析[J]. 中国沙漠,2014, 34(6):1633-1640.[Liu Honglan, Zhang Qiang, Guo Junqin, et al. Spatial differentiation of spring precipitation in the Heihe River Basin and its correlation with the river flow[J]. Journal of Desert Research,2014, 34(6):1633-1640.]

[18]王蕙, 赵文智, 常学向. 黑河中游荒漠绿洲过渡带土壤水分与植被空间变异[J]. 生态学报,2007,27(5):1731-1739.[Wang Hui, Zhao Wenzhi, Chang Xuexiang. Spatial variability of soil moisture and vegetation in desert-oasis ecotone in the middle reaches of Heihe River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica,2007,27(5):1731-1739.]

[19]唐振兴, 何志斌, 刘鹄. 黑河上游山区土壤非饱和导水率测定及其估算—以排露沟流域为例[J]. 生态学杂志,2011,30(01):177-182.[Tang Zhenxing, He Zhibin, Liu Hu. Observation and simulation of soil unsaturated hydraulic conductivity in mountain region of upper Heihe River: A case study of Pailugou catchment[J]. Chinese Journal of Ecology,2011,30(1):177-182.]

[20]田杰. 黑河上游不同植被类型剖面土壤水文特征分析[D]. 兰州:兰州大学,2019.[Tian Jie. Soil Hydrological Characteristics under Different Land Covers in the Upper Stream of the Heihe River Watershed[D]. Lanzhou :Lanzhou University,2019.]

[21]程一本. 干旱半干旱地区典型沙地深层土壤水分渗漏过程研究[D]. 北京:中国林业科学研究院,2018.[Cheng Yiben. Study on the Characteristics of Deep Sandy Soil Recharge in Typical Arid and Semi-arid Region[D]. Beijing: Institute of Desertification Studies,2018.]

[22]马驰, 蔡国军, 莫保儒, 等. 半干旱黄土区不同植被类型土壤水分时序变化差异性研究[J/OL]. http://doi-org-

s.webvpn.lzu.edu.cn/10.13456/j.cnki.lykt.2019.07.03.0001, 2020-02-05.[Ma Chi,Cai Guojun,Mo Baoru,et al. Study on the temporal variation of soil moisture in different vegetation types in semi-arid loess region[J/OL]. http://doi-org-s.webvpn.lzu.edu.cn/10.13456/j.cnki.lykt.2019.07.03.0001, 2020-02-05.]

[23]陈敏玲，张兵伟，任婷婷，等. 内蒙古半干旱草原土壤水分对降水格局变化的响应[J]. 植物生态学报,2016,40(7):658-668. [Chen Minling, Zhang Bingwei, Ren Tingting, et al. Responses of soil moisture to precipitation pattern change in semiarid grassland in Nei Mongol,China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2016,40(7):658-668.]

[24]李艳萍，史利江，徐满厚，等. 短期增温下青藏高原多年冻土区植物生长季土壤水分的动态变化[J]. 干旱区研究,2019,36(3):537-545.[Li Yanping, Shi Lijiang, Xu Manhou, et al. Effect of short-term warming on dynamic change of soil moisture content in growing season in the permafrost regions of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Arid Zone Research, 2019,36(3):537-545.]

[25]李永娥. 西北季节冻土区浅层土体冻融过程及水热变化对气候的响应[D]. 兰州:兰州理工大学,2019.[LiYonge. Response of Soil Freezing-thawing Process and Hydrothermal Change of Shallow Soil in the Northwest Seasonal Frozen Soil Region to Climate[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology,2019.]

[26]和萍. 基于 MODIS 数据西北山地植被返青期时空变化及其影响因素研究[D]. 云南:云南师范大学,2018.[He Ping. Research on Spatiotemporal Change and the Influence Factors of Vegetational Returning Green Stage in Northwest Mountainous Area of China Based on MODIS data[D]. Yunnan: Yunnan Normal University,2018.]

the Changes of Shallow Soil Moisture and Its Influencing Factors in the High Mountain Areas of the Upper Heihe River

LYU Ming-xia[1,2], WANG Yi-bo[1], LIU Guo-hua[3]

(1. *College of Earth and Environment Sciences,Lanzhou University,Lanzhou* 730000,*Gansu*;

2. *Hydrology and Water Resources Survey Bureau in Dingxi,Dingxi* 743000,*Gansu;*

3. *University of Chinese Academy of Sciences,Beijing* 100049,*China*)

Abstract: Soil water is the basis for the existence of vegetation ecosystem. Using statistics and correlation analysis method, the shallow soil moisture and its influencing factors of different types of grasslands in the upper reaches of the Heihe River were analyzed, and the results show that rainfall determines the spatial distribution of soil moisture content in the upstream of Heihe River under the natural state, but agricultural activities promote infiltration which reducing the 30cm soil layer soil moisture content and making the deep soil moisture content increased; Main influence factor of different soil moisture in soil layer were analyzed, the precipitation strongly influence on soil moisture fluctuations in the range of 0~20cm soil thickness, and because of the interception of precipitation along the plant stem and root of intensive distribution makes the soil volumetric water content of soil thickness about 10 ~ 20cm is the largest. However, the change of air temperature affects soil temperature and mainly acts on soil moisture below the 30cm soil layer in the non-growing period, leading to the extension of vegetation growth period and shortening of freezing period in the study area and changing the regional hydrological and ecological environment.

Key words: Alpine region; Soil moisture; Influence factor; Climate change;